

Capítulo 4.1

Desafíos desde la ingeniería marítima:
bases para el desarrollo de un
sistema de pronóstico integrado
del territorio marítimo nacional

Playa de la costa oceánica uruguaya. Fotografía de Margarita González Rodríguez-Villamil (margamepics@gmail.com).

Capítulo 4.1

Desafíos desde la ingeniería marítima: bases para el desarrollo de un sistema de pronóstico integrado del territorio marítimo nacional

Mónica Fossati,¹ Rodrigo Alonso,¹ Fernanda Maciel,¹ Rodrigo Mosquera,¹
Pablo Santoro,¹ Sebastián Solari¹ y Francisco Pedocchi¹

¹ Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental (IMFIA),
Facultad de Ingeniería, Universidad de la República

Introducción¹

La gestión de cuerpos de agua incorpora cada vez más el uso de herramientas de modelación numérica como soporte para la toma de decisiones y la definición de políticas (Vinçon-Leite y Casenave, 2019; Schuwirth *et al.*, 2019). Desde hace años se tiende al desarrollo de sistemas de información de

gestión ambiental que tengan en cuenta aspectos sociales, ecológicos y económicos. Estos sistemas integran: información geográfica; mediciones continuas realizadas *in situ* y resultantes de sensoramiento remoto; y modelos numéricos, que interactúan con el objetivo de apoyar procesos de toma de decisiones, tanto en la gestión de largo plazo como en la implementación de medidas de control y mitigación de emergencias en el corto plazo (Torres-Bejarano *et al.*, 2013).

La oceanografía operacional refiere a la previsión de las condiciones del estado de los océanos a gran escala (Schiller y Brassington, 2011). En el ámbito internacional, el desarrollo de la temática ha sido principalmente impulsado por el Global Ocean Data Assimilation Experiment (GODAE), creado en 1997 con el objetivo de coordinar e integrar la investigación asociada a sistemas globales y regionales de predicción y análisis de los océanos. A partir de 2009 dos grupos emergieron del original GODAE para

¹ Agradecemos el apoyo obtenido durante muchos años para el desarrollo de la investigación aplicada en el mar territorial uruguayo con base en fondos concursables de la Agencia Nacional de Investigación e Innovación (ANII) y la Comisión Sectorial de Investigación Científica CSIC) de la Universidad de la República (Udelar), principalmente, y a las contrapartes (instituciones públicas y privadas) que han confiado en el Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental y en la Universidad para realizar estudios: Administración Nacional de Combustibles, Alcohol y Portland, Administración Nacional de Puertos, Dirección Nacional de Medio Ambiente, Dirección Nacional de Hidrografía, Intendencia de Montevideo, Administración Nacional de Usinas y Trasmisiones Eléctricas, entre otras.

continuar con el desarrollo de la oceanografía operacional, el GOV-GODAE OceanView y el ET-OOFS-JCOMM Expert Team for Operational Ocean Forecasting.² Por otra parte, desde 1991 se viene desarrollando un sistema de observación global de los océanos (Global Ocean Observing System, GOOS).

El GOOS está dirigido por la Comisión Oceanográfica Intergubernamental (COI) de la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO) y copatrocinado por la Organización Meteorológica Mundial (OMM), el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) y el Consejo Científico Internacional (ISC). En el marco del GOOS funciona el grupo experto sobre sistemas de pronósticos oceánicos operacionales (Expert Team on Operational Ocean Forecast Systems, ETOOFS), que ha generado recomendaciones específicas para el desarrollo de sistemas de observación y pronósticos (Álvarez Fanjul *et al.*, 2022). Además, Ocean Observing Co-Design, Observing Together y CoastPredict son los tres programas del GOOS que pretenden impulsar activamente la transformación necesaria para lograr los objetivos del Decenio Oceánico (2021-2030) y mejorar el sistema mundial de observación. El CoastPredict trata, justamente, del desarrollo de un sistema integrado de pronóstico costero marino basado en observaciones y modelación numérica, con interacción con usuarios, sistemas digitales de intercambio de información y desarrollo de productos específicos para necesidades locales.

2 Información disponible en <https://www.godae-oceanview.org/>

Uruguay tiene varios desafíos por delante en cuanto a la gestión ambiental de los usos de sus aguas territoriales marítimas y desde la ingeniería marítima es posible aportar al desarrollo de estos. Es muy clara la relevancia del territorio marítimo uruguayo en aspectos vinculados a navegación, pesquería, turismo, biodiversidad, contaminación, energías renovables, entre otras, y es clara también la necesidad de comprender y conocer el sistema para poder hacer uso de manera sustentable, garantizando el cumplimiento de compromisos ambientales internacionales asumidos.

Uruguay no dispone actualmente de un sistema de pronóstico institucional de las condiciones marítimas para sus aguas nacionales. De hecho, las mediciones oceánicas son escasas y en su mayoría se trata de mediciones del nivel del mar a lo largo de la costa. Existe, por lo tanto, una fuerte necesidad de desarrollar una base de datos histórica nacional y un sistema de pronóstico que integre resultados de modelos numéricos, mediciones *in situ* e información de teledetección, para cubrir esta escasez de información y permitir a las autoridades y a los ciudadanos tomar decisiones basadas en evidencias.

En este sentido, cabe destacar que desde el año 2021 está en funcionamiento el sistema de pronóstico de condiciones meteoceánicas en las aguas territoriales marítimas uruguayas, PronUy_RPFM.³ Este sistema fue generado en el marco de un grupo de investigación de la Facultad de Ingeniería (Fing-Udelar) apoyado por la CSIC de la Udelar (Ballesteros, 2021; Sellanes *et al.*, 2022; Balparda *et al.*, 2022). El sistema cuenta

3 Disponible en <https://www.fing.edu.uy/imfia/pronostico-marea/>

actualmente con un producto disponible en tiempo real, el pronóstico del nivel de mar horario para los próximos tres días, el cual se evalúa contra datos *in situ* recolectados por mareógrafos publicados en tiempo real. Este sistema puede considerarse como punto de partida hacia la incorporación, mediante su impulso en el ámbito de las instituciones nacionales, del territorio marítimo nacional en las iniciativas globales (como el Programa CoastPredict del GOOS).

Contar con un sistema de pronóstico de este tipo permite comprender mejor la respuesta de las aguas estuarinas y oceánicas de Uruguay a las intervenciones actuales y futuras. Esto tendría un enorme impacto para la gestión del sistema estuario-océano y para la adaptación al cambio global, y podría satisfacer, por ejemplo, las necesidades de las autoridades nacionales de medioambiente, navegación y pesca, los gobiernos locales, las organizaciones no gubernamentales medioambientales, los pescadores locales y otras partes interesadas. Además, proporcionaría evidencia cualitativa y, especialmente, cuantitativa para el establecimiento de nuevas áreas marinas protegidas (AMP). Por último, un sistema de pronóstico operativo constituye una gran base de datos de toda la información metocéánica, medida y modelada, procesada y con control de calidad, que podrá ser utilizada para otro tipo de cálculos y aplicaciones.

En este capítulo se describen algunos esfuerzos recientes, de los que el Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental (IMFIA) de la Fing-UdelaR ha participado y que contribuyen a la generación de un sistema de información confiable

y rigurosa, que sirva como base para el desarrollo de un sistema de pronóstico de las condiciones del territorio marítimo nacional. Se describen aspectos de recolección y procesamiento de información, como son las mediciones *in situ*, las campañas oceanográficas y el sensoramiento remoto (tanto satelital como con estaciones fijas al nivel del mar y aeronaves no tripuladas). Por otro lado, se presenta información generada a partir de modelos numéricos, para las mareas, el oleaje, la temperatura y la salinidad del agua, y el transporte de los sedimentos finos que provienen de la cuenca de los ríos Paraná y Uruguay, y abundan en el lecho del Río de la Plata, así como resultados vinculados a la dinámica costera. Finalmente, se presentan productos específicos vinculados a la determinación del potencial de energías renovables marítimas en el mar territorial uruguayo, a la cuantificación del efecto del cambio climático sobre los niveles de mar en la costa uruguaya y al sistema de pronóstico operativo de variables metocéánicas disponible en tiempo real PronUy_RPFM.

Observaciones

Mediciones continuas

El costo de los trabajos en el mar es muy elevado y esto ha limitado históricamente las mediciones en el Río de la Plata y el océano Atlántico. Esto se hace notorio en las mediciones continuas, ya que las maniobras de fondeo de equipos suelen requerir: el uso de embarcaciones mayores; trabajar con buzos especializados en aguas turbias, que muchas veces trabajan a ciegas; desarrollar estrategias de fondeo para lechos de barro con muy

bajo poder soporte; y, por supuesto, el riesgo de perder equipos muy costosos. Como contraparte, las mediciones continuas permiten una comprensión de la dinámica del mar que las campañas oceanográficas puntuales no pueden aportar, permitiendo observar el mar

durante eventos de tormenta, en condiciones en que sería imposible navegar, y registrar las variables con resoluciones temporales muy diversas, permitiendo observar variaciones que van desde fracciones de segundo hasta años y décadas.

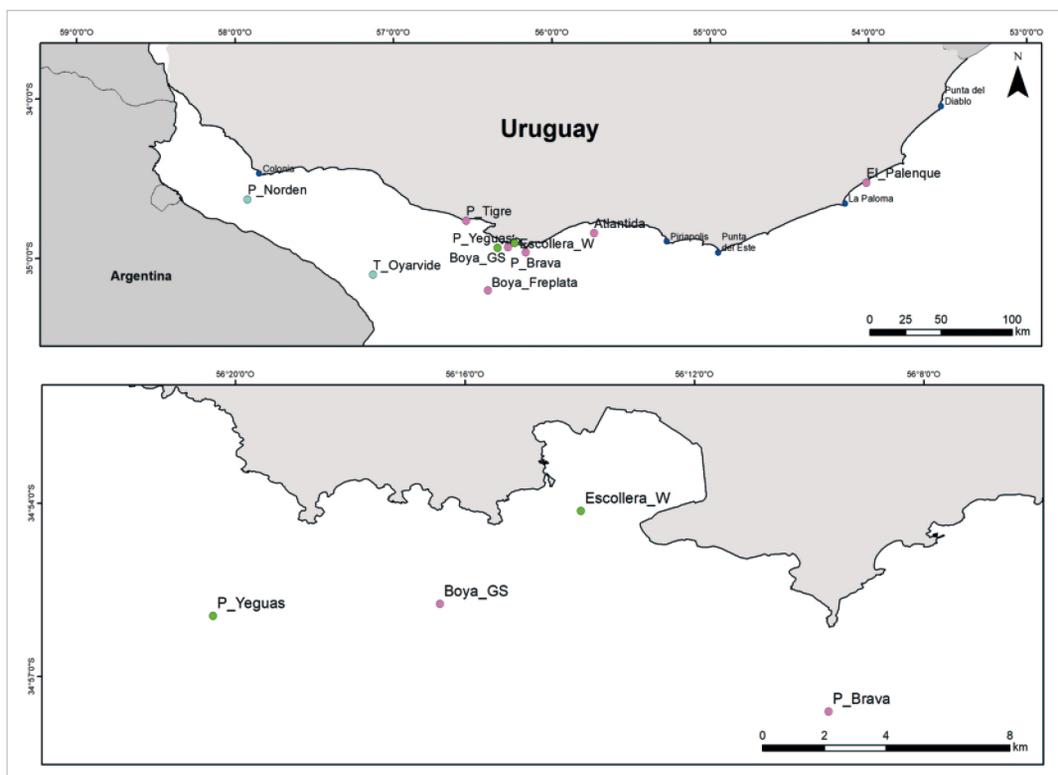


Figura 1: Distribución de los puntos de medición continua en los que participó el IMFIA. Arriba, vista general del Río de la Plata. Abajo, detalle de la costa de Montevideo. Los marcadores rosados indican mediciones de oleaje, corrientes, temperatura y otros parámetros; los verdes, corrientes y temperatura; y los celestes, temperatura salinidad y turbidez.

Desde el año 2005, el IMFIA ha apoyado diversas iniciativas de entidades nacionales públicas y privadas para viabilizar las mediciones continuas, todas en la cercanía de la costa. En algunos casos estas mediciones se realizaron en el marco de convenios de trabajo, durante períodos de tiempo acotados, teniendo a cargo el IMFIA la realización de todos los trabajos y siendo el propietario de

los equipos fondeados. En otras ocasiones, el IMFIA, también en el marco de convenios de trabajo, ha apoyado iniciativas para la realización de mediciones, diseñando los fondeos, realizando los mantenimientos y procesando la información recolectada. Finalmente, el IMFIA ha participado activamente de iniciativas nacionales y binacionales para la medición en el Río de la Plata.

En la figura 1 se presenta la ubicación de las distintas iniciativas. A continuación, se describen brevemente algunos de los trabajos realizados en el marco de convenios con distintas entidades y se presentan los principales resultados obtenidos.

Punta Brava y Punta Yeguas, Montevideo, Intendencia de Montevideo

En el marco del seguimiento de la integridad del emisario subacuático que descarga las aguas del saneamiento de la ciudad de Montevideo en Punta Brava y la planificación de las obras del emisario de Punta Yeguas, se

fondearon dos equipos capaces de medir corrientes y oleaje. Los trabajos de fondeo estuvieron a cargo de la Armada Nacional, los equipos eran propiedad de la Intendencia de Montevideo (IM) y el IMFIA tuvo a cargo la selección de los equipos, el diseño de la maniobra de fondeo y el procesamiento de los datos recabados. Los equipos fueron perfiladores acústicos de corrientes por efecto Doppler (ADCP, por sus siglas en inglés) y permitieron la medición de corrientes y oleaje en Punta Brava entre diciembre de 2003 y noviembre de 2009, y de corrientes en Punta Yeguas entre febrero de 2004 y junio de 2008 (IMFIA, 2009).

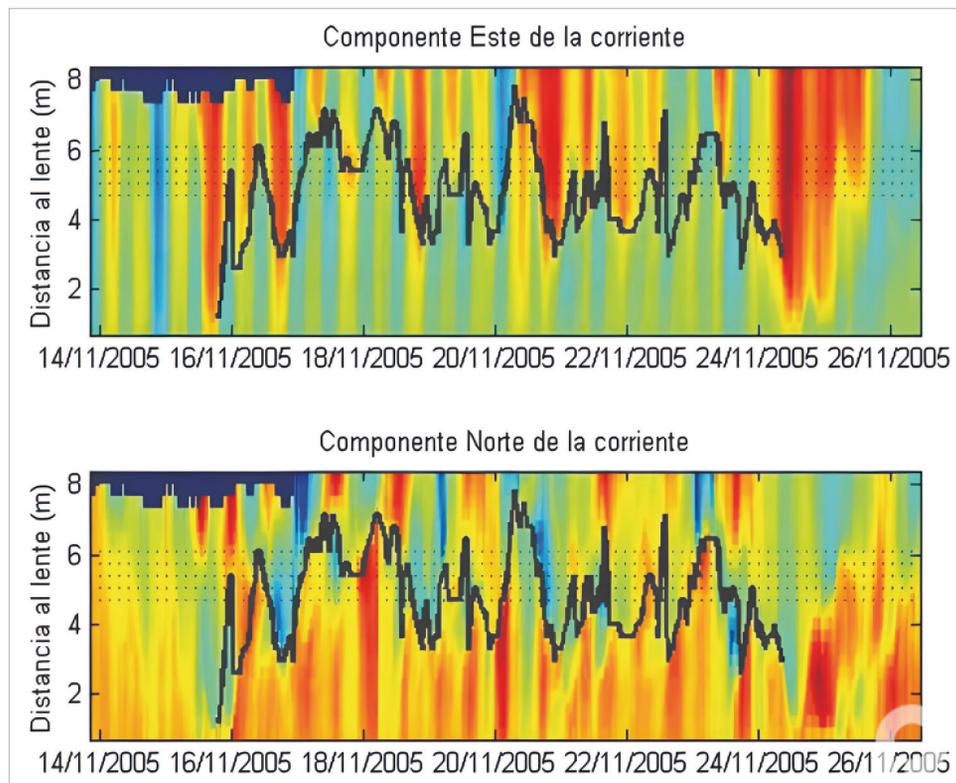


Figura 2: Componentes este y norte del perfil de velocidades registrados en Punta Brava. Los colores indican la magnitud de la velocidad, en rojo valores positivos y en azules los valores negativos. La línea negra muestra la profundidad a la que existe un cambio de densidad del agua. Puede observarse cómo las corrientes son diferentes por encima y por debajo del salto de densidad.

Esta fue la primera vez que se midieron corrientes y oleaje con ADCP en la costa uruguaya, lo que permitió observar de forma continua el perfil de velocidades en la columna de agua y la persistencia de la estratificación de la columna de agua por períodos de una semana. El equipo de Punta Brava se encontraba en el agua durante el temporal del 25 de agosto de 2005 y registró el oleaje hasta que los esfuerzos hidrodinámicos lo volcaron; afortunadamente el equipo pudo ser recuperado. En la figura 2 se presenta un ejemplo de las mediciones de corrientes obtenidas en Punta Brava durante algunos días de noviembre de 2005 (Pedocchi *et al.*, 2010, 2012).

Proyecto FREPLATA, Comisión Administradora del Río de la Plata, Comisión Técnica Mixta del Frente Marítimo, Fondo Francés para el Medio Ambiente Mundial, Agencia Francesa de Desarrollo

Promovido por el consorcio entre la Comisión Administradora del Río de la Plata y la Comisión Técnica Mixta del Frente Marítimo (CARP-CTMFM), financiado por el Fondo Francés para el Medioambiente Global e implementado por la Agencia de Cooperación Francesa para el Desarrollo y el Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo, el Proyecto FREPLATA “Estudio de la dinámica hidro-sedimentológica del Río de la Plata: Observación y modelación numérica de los sedimentos finos” resultó en un esfuerzo trinacional de colaboración científica entre el Instituto Francés para la Explotación del Mar (IFREMER), de Francia, junto con el Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera (CIMA), el Instituto Nacional de Investigación y Desarrollo Pesquero (INIDEP) y el Instituto Nacional del Agua (INA), de Argentina, y el IMFIA, de Uruguay, con el apoyo del Servicio

de Hidrografía Naval (SHN), de Argentina, y el Servicio de Oceanografía, Hidrografía y Meteorología de la Armada (SOHMA), de Uruguay.

Durante el proyecto se colocó una boya oceanográfica frente a Montevideo, se instrumentó el Pilote Norden, frente a Colonia, y la Torre Oyarvide, frente a Punta Piedras. Entre noviembre de 2009 y diciembre de 2010 se registraron datos de corrientes, oleaje, temperatura, salinidad, turbidez y otras variables en la boya; y de temperatura, salinidad, turbidez y nivel en Pilote Norden y en Torre Oyarvide. El proyecto fue un hito en la medición continua en el Río de la Plata y permitió contar por primera vez con series simultáneas en la zona intermedia e interior del estuario (FREPLATA, 2011; Simionato *et al.*, 2011; Fossati, 2013).

Punta del Tigre, San José, Administración Nacional de Usinas y Trasmisiones Eléctricas (UTE)

En el marco del proyecto y la construcción de la nueva central de ciclo combinado para la producción de energía eléctrica, la UTE financió la medición continua de corrientes, temperatura, salinidad y turbidez frente a la zona de Punta del Tigre. La medición continua fue implementada de forma completa por el IMFIA y fue acompañadas por campañas de medición trimestrales de parámetros fisicoquímicos y biológicos a cargo de la Sección Limnología de la Facultad de Ciencias de la Udelar (IMFIA, 2021b).

Las series de datos registradas probablemente sean de las más largas disponibles en el Río de la Plata y van desde diciembre de 2014 hasta agosto de 2021, e incluyeron el fondeo

de un ADCP y de un sensor combinado de conductividad, temperatura y profundidad (CTD, en inglés). Esta medición permitió observar el cambio en las variables registradas a lo largo del pasaje de un período climático Niño a un período Niña, mostrando de forma explícita la alta variabilidad del Río de la Plata en la zona intermedia. La dinámica general del Río de la Plata, particularmente la descarga de los ríos Paraná y Uruguay, tiene periodicidades de entre 3 y 6 años vinculadas con el fenómeno de El Niño-Oscilación Sur. Los primeros dos años de medición se encontraron dentro de un período Niño muy fuerte, con descargas fluviales por encima de la media; los años 3 y 4 correspondieron a años Niño y Niña débiles; mientras que los últimos dos fueron dentro de un período Niña moderado, con caudales por debajo de la media (Maciel *et al.*, 2021).

Bocana oeste de la bahía de Montevideo, Administración Nacional de Puertos (ANP)

Como parte de estudios de la circulación del agua en la bahía de Montevideo y la renovación del agua dentro de esta para la ANP, se realizaron mediciones de velocidad entre la Escollera Oeste y el Cerro de Montevideo, fondeando un ADCP entre agosto de 2016 y mayo de 2017 (IMFIA, 2016a).

Las mediciones confirmaron los resultados de simulaciones numéricas realizadas en el IMFIA y mostraron la salida/entrada de agua por la bocana oeste y el ingreso/salida de agua por el canal de entrada al puerto entre

la Escollera Sarandí y la Escollera Oeste, proceso fuertemente dominado por el ciclo de marea y el viento.

El Palenque, Rocha, Dirección Nacional de Hidrografía (DNH), Ministerio de Transporte y Obras Públicas

Como parte de los estudios asociados al proyecto de un puerto de aguas profundas, se realizaron mediciones frente a la costa de Rocha, al este del balneario La Paloma. En este caso se fondeó un ADCP a 19 m de profundidad y se registraron corrientes y oleaje, para la DNH, entre febrero y junio de 2016 (IMFIA, 2007). Previamente a este fondo, que gestionó completamente el IMFIA, se realizaron tareas de apoyo en la configuración de instrumentos, mantenimiento durante los fondeos y procesamiento de datos, durante fondeos que estuvieron a cargo del SOHMA. Este conjunto de registros es de los pocos disponibles en la costa oceánica de Rocha.

Punta de Sayago, Montevideo, Gas Sayago SA

Entre diciembre de 2015 y febrero de 2018 el IMFIA brindó servicios de mantenimiento y procesamiento de datos de la boya oceanográfica que adquirió Gas Sayago SA (Figura 3a) (IMFIA, 2018a). La boya estaba equipada con sensores para medir y reportar en tiempo real oleaje, corrientes en la columna de agua, temperatura y salinidad del agua en la superficie, y variables meteorológicas.

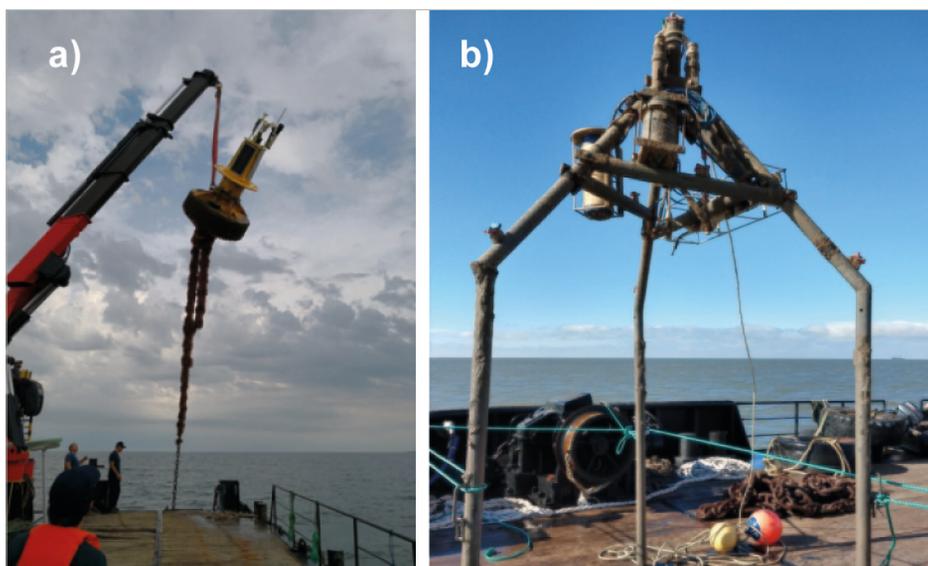


Figura 3: a) Retiro de la boya de Gas Sayago para mantenimiento; b) foto del trípode al ser extraído en agosto de 2018.

Punta de Sayago, Montevideo, CSIC-Udelar

Vinculado al mantenimiento de la boya y aprovechando la existencia de esas mediciones, el IMFIA concursó por fondos del programa de Proyectos de Investigación y Desarrollo de la CSIC, y fondeó un trípode instrumentado junto a la boya entre diciembre de 2017 y febrero de 2018, y entre mayo y agosto de 2018 (IMFIA, 2018b; Mosquera Núñez, 2021). El trípode fue diseñado para hincarse en el lecho de barro, asegurando su estabilidad por fricción entre las patas y el lecho en lugar de utilizar su peso, ya que esta última estrategia lleva a que los equipos se entierren en el barro blando que abunda frente a las costas de Montevideo (figura 3b).

Los equipos instalados en el trípode incluyeron: un CTD para registrar salinidad y temperatura; un perfilador ultrasónico

multifrecuencia capaz de registrar altas concentraciones de barro fluido junto al lecho del río, dos sensores ópticos de turbidez y un sensor de velocidades (ADV) capaz de registrar fluctuaciones turbulentas de la velocidad inducida por corrientes y oleaje junto al lecho. Estos equipos se complementaron con los sensores instalados en la boya oceanográfica de Gas Sayago.

Esta fue la primera experiencia nacional de fondeo de un trípode instrumentado en el Río de la Plata y permitió confirmar de forma directa la formación de una capa hiperconcentrada de barro fluido por efecto del oleaje durante las tormentas y la ocurrencia de estratificación de la columna de agua por efecto de la concentración de sedimentos (figura 4). Esta observación es de suma importancia para comprender el proceso de sedimentación en los canales de navegación del puerto.

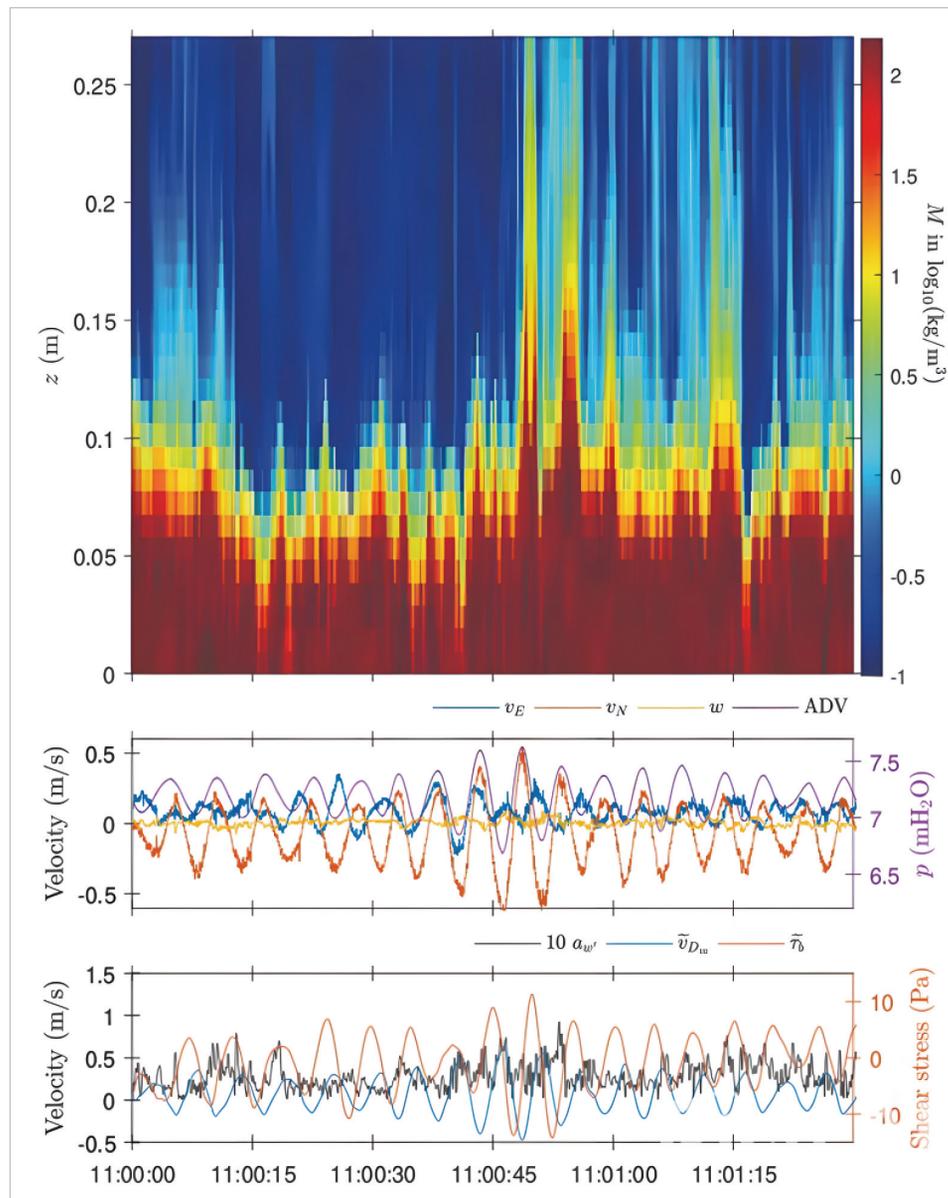


Figura 4: Ejemplo de mediciones realizadas desde el trípode. Se puede apreciar la formación de una capa de barro fluido hiperconcentrado junto al fondo por acción del oleaje.

Atlántida, Canelones, DNH

Como parte de los trabajos realizados para la DNH vinculados al proyecto de un puerto deportivo en Atlántida, se fondeó un

ADCP 5 kilómetros mar adentro de la costa (IMFIA, 2020b). En este caso se repitió la estrategia de fondeo por hincado, diseñando una base con patas que se enterraban en el lecho de barro. Se registraron datos de

corrientes y oleaje entre julio de 2019 y mayo de 2020. Las mediciones mostraron una zona con mayor acción de oleaje que la costa de Montevideo, donde los cambios de salinidad resultaban en cambios en el comportamiento de los sedimentos cohesivos.

*Punta Brava, Montevideo,
Intendencia de Montevideo*

La boya propiedad de Gas Sayago SA fue adquirida por la IM y se encuentra fondeada en este momento al sur de Punta Brava. El IMFIA ha acompañado a los profesionales de la IM en el proceso de transferencia de la propiedad, teniendo a cargo el mantenimiento, configuración de los instrumentos y el control de calidad de los datos registrados (IMFIA, 2021a). La boya entró en funcionamiento en el mes de febrero de 2023 y en este momento registra y reporta en tiempo real oleaje, corrientes y temperatura del agua, además de variables meteorológicas. Se espera que esta boya, junto a otras que recientemente ha fondeado la Armada Nacional, conformen los primeros pasos para una red de monitoreo costero del Uruguay.

Sensoramiento remoto

Los sensores remotos ópticos registran información del espectro electromagnético de la luz en distintas bandas del rango visible e infrarrojo. La gran mayoría de los sensores remotos actuales, montados en aeronaves o satelitales, son multiespectrales, lo que significa que cada banda está compuesta por un rango relativamente ancho de longitudes de onda, habiendo poco o nulo solapamiento entre bandas. A medida que se agregan bandas contiguas que cubren rangos menores,

se logra capturar de manera continua el espectro electromagnético, denominándose a estos sensores como hiperespectrales.

Imágenes satelitales de color del mar

El Proyecto FREPLATA marcó un primer hito en el uso de imágenes satelitales de color del mar para la cuantificación de sedimentos en suspensión y clorofila-a en el Río de la Plata, mostrando tanto el potencial como las limitaciones que tenían los sensores y algoritmos de procesamiento disponibles en ese momento, que estaban diseñados principalmente para aplicaciones en aguas oceánicas. El lanzamiento de nuevos satélites y el desarrollo de algoritmos de procesamiento enfocados en aguas costeras e interiores han permitido en los últimos años seguir avanzando en el uso de imágenes satelitales para cuantificar turbidez, sedimentos en suspensión, materia orgánica coloreada disuelta y clorofila-a.

El uso de información satelital en el Río de la Plata tiene la gran ventaja de dar una visión sinóptica del estuario, que complementa la alta resolución temporal de las mediciones continuas *in situ*, que tienen grandes limitaciones en la cobertura espacial. Esta visión sinóptica es particularmente relevante cuando se analizan los frentes de salinidad o turbidez, o la ocurrencia de una floración de fitoplancton. Estos fenómenos presentan variaciones bruscas en el espacio, lo que dificulta su caracterización a partir de mediciones en un punto. Esto también se manifiesta en la validación de los modelos numéricos con base en series puntuales; el modelo numérico puede estar realizando un muy buen trabajo en representar la realidad, pero un error de

unos pocos metros en la ubicación del frente salino, por ejemplo, puede manifestarse como un gran error en la predicción de la salinidad en un punto.

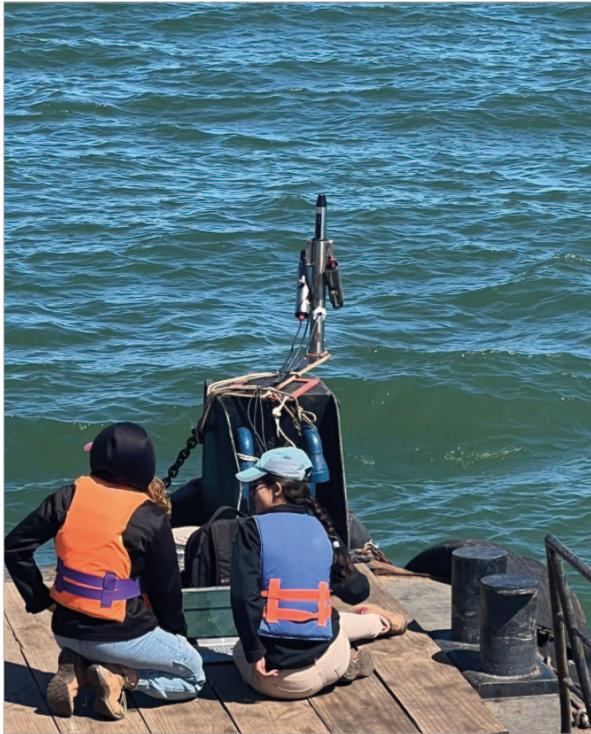


Figura 5: Mediciones con espectralradiómetros hiperespectrales desde una embarcación.

Los satélites de observación del mar registran la reflectancia en el tope de la atmósfera para distintas bandas del espectro electromagnético de la luz, en el rango visible e infrarrojo cercano. La señal que registran los sensores satelitales está compuesta por las señales provenientes tanto del agua como de la atmósfera. Estas últimas no son despreciables y deben ser removidas para obtener la reflectancia del agua a nivel del mar. La reflectancia del agua refiere a la fracción de la energía electromagnética incidente por unidad de área, en este caso proveniente del sol, que retorna desde el cuerpo de agua. La

forma y la magnitud del espectro de reflectancia son el resultado del tipo y la concentración de las sustancias que se encuentran disueltas y particuladas en el agua.

Los altos valores de turbidez y clorofila-a que se dan en el Río de la Plata, pero principalmente su alta variabilidad temporal y espacial, limitan el uso de algoritmos de corrección atmosférica y de procesamiento del espectro de reflectancia desarrollados en otros ambientes para estimar los sedimentos en suspensión y la clorofila-a, entre otros parámetros. Esto hace necesario, primero, realizar mediciones a nivel del mar del espectro de reflectancia del agua utilizando espectralradiómetros en simultáneo con el pasaje de los satélites, de forma de poder evaluar el desempeño de los algoritmos de corrección atmosférica (figura 5). Segundo, realizar análisis en el laboratorio de muestras de agua tomadas también en simultáneo para caracterizar los principales componentes ópticamente activos⁴ del agua (concentración de sedimentos en suspensión, absorción de materia orgánica coloreada disuelta, concentración de clorofila-a y eventualmente otros parámetros, como concentraciones de pigmentos algales o tamaño de partículas en suspensión; figura 6). Estas actividades se desarrollaron en el IMFIA con el apoyo del Fondo María Viñas de la Agencia Nacional de Investigación e Innovación (ANII) y durante tres años se realizaron mediciones simultáneas al pasaje del satélite Sentinel 2 en la costa del departamento de San José, que permitieron validar un algoritmo de

⁴ Un componente ópticamente activo es aquel cuya variación produce cambios detectables en la magnitud o la forma del espectro de reflectancia del agua.

corrección atmosférica, evaluar índices para estimación de turbidez y clorofila-a existentes, y desarrollar nuevas metodologías para estimar turbidez, materia orgánica coloreada disuelta y clorofila-a a partir de las imágenes de Sentinel 2 (IMFIA, 2021a; Maciel y Pedocchi, 2021; Maciel *et al.*, 2023). A partir de estos resultados fue posible generar mapas con la variabilidad espacial de estos parámetros con una resolución del orden de los 10-20 metros (figuras 7 y 8).

El avance en los sensores que equipan los satélites es permanente y es de esperar que en los próximos años se cuente con misiones hiperespectrales y mejores herramientas para su procesamiento en zonas costeras. Esta mayor resolución en el espectro de reflectancia permitirá mejorar la cuantificación y caracterizar en mayor detalle los componentes que se encuentran en el agua.

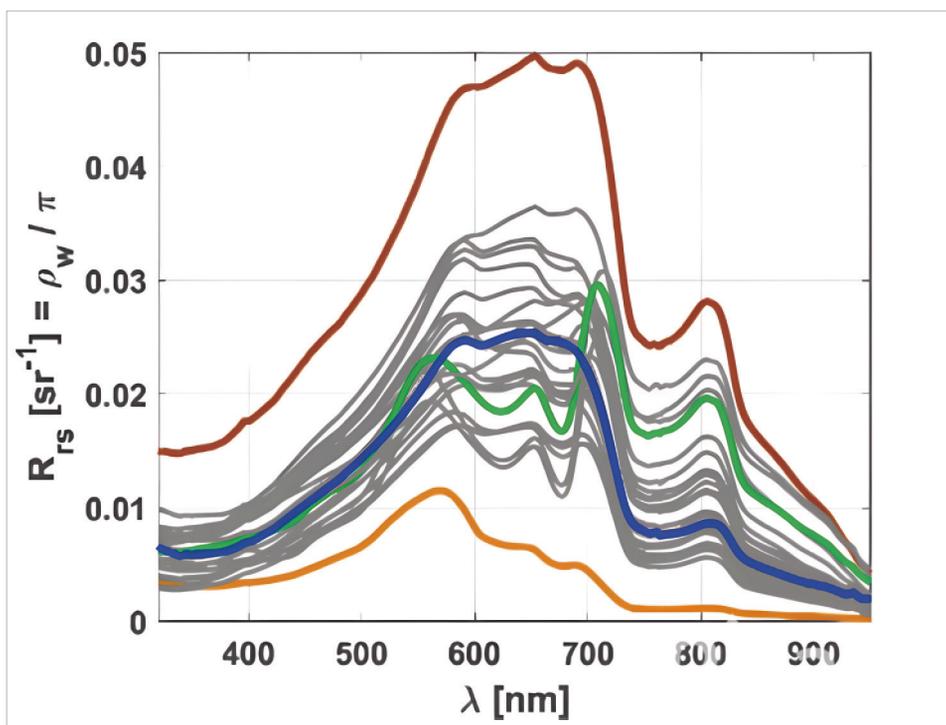


Figura 6: Espectros de reflectancia para distintas condiciones de las aguas del Río de la Plata. Las curvas marrones muestran dos casos de muy baja y muy alta turbidez, la curva azul muestra un caso de baja concentración de clorofila-a y la verde un caso de alta concentración. Tanto el valor como la forma de los espectros permiten identificar y cuantificar las sustancias que se encuentran en el agua.

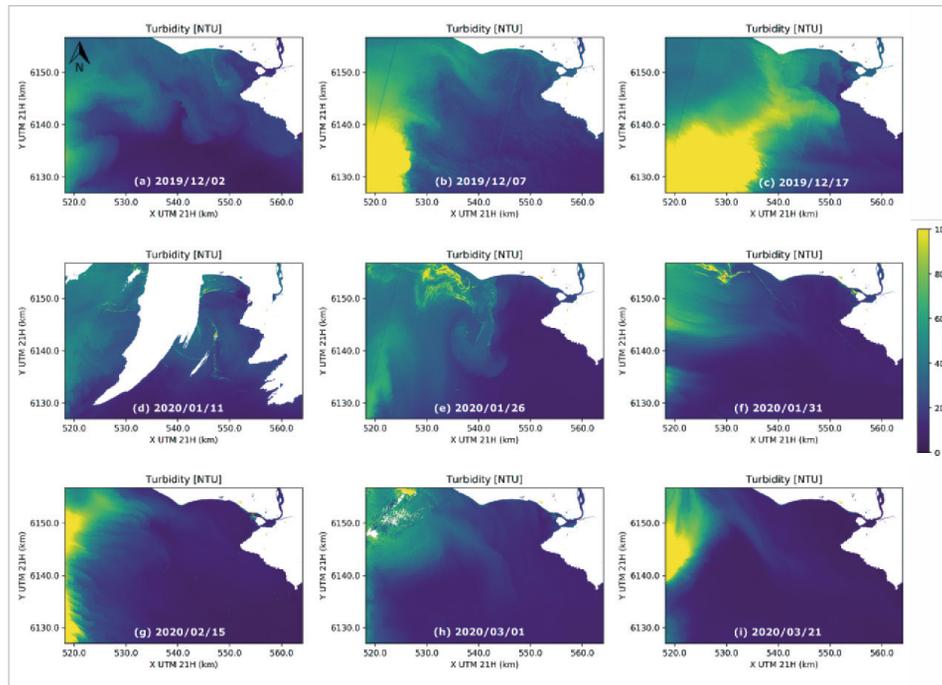


Figura 7: Mapas de niveles de turbidez superficial en la costa norte del Río de la Plata, en la zona de la desembocadura del río Santa Lucía en el verano 2019-2020. Interesa notar que el mapa del panel (d) está afectado por la presencia de nubes. Fuente: Maciel et al., 2023.

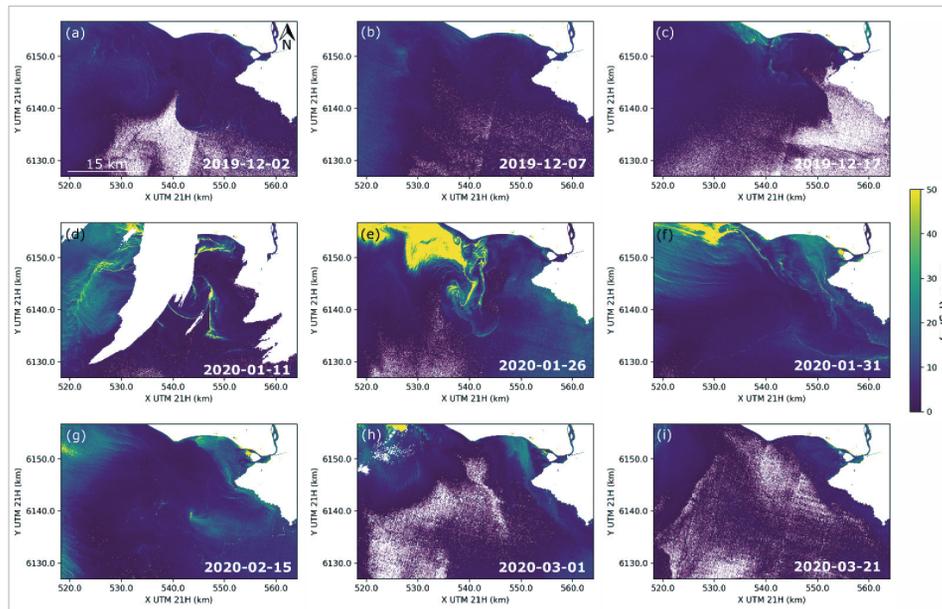


Figura 8: Mapas de concentraciones de clorofila-a superficial en la costa norte del Río de la Plata, en la zona de la desembocadura del río Santa Lucía en el verano 2019-2020. Interesa notar que el mapa del panel (d) está afectado por la presencia de nubes. Fuente: Maciel et al., 2023.

*Imágenes tomadas desde
aeronaves no tripuladas*

En los últimos años se ha popularizado el uso de aeronaves no tripuladas (drones), lo que permite adquirir imágenes desde la altura, que anteriormente sólo podían lograrse utilizando una avioneta. También comenzaron a comercializarse cámaras multispectrales que registran bandas adicionales más allá de las bandas roja, verde y azul (RGB) de las cámaras a color tradicionales. La combinación de una cámara multispectral instalada en un dron permite obtener, con un costo acotado, coberturas espaciales relativamente importantes con resoluciones mucho mayores a

las que brindan los satélites y a demanda, es decir, no solamente cuando pasa un satélite. Esto es especialmente útil para estudios locales en zonas particulares del Río de la Plata. En el marco de un proyecto gestionado por la CSIC y financiado por la UTE (IMFIA, 2021c), se realizaron mediciones y se desarrollaron herramientas informáticas para procesar imágenes tomadas con una cámara multispectral en una aeronave no tripulada. Los trabajos permitieron, por ejemplo, observar la extensión de la pluma de descarga de agua caliente de la Central Térmica de Punta del Tigre utilizando una cámara infrarroja (figura 9).



Figura 9: Vista de la Central de Punta del Tigre, mostrando la pluma de agua caliente medida desde una aeronave no tripulada con una cámara infrarroja térmica.

Modelación numérica

Generalidades

Además del monitoreo y los análisis teóricos, el desarrollo y el uso de modelos numéricos hidrodinámicos y de transporte de sustancias, que resuelvan las variables de flujo (niveles, corrientes), el oleaje y las propiedades determinantes para el transporte de sustancias (temperatura, salinidad, sedimento en suspensión), resulta algo imprescindible hoy en día para la gestión de la calidad ambiental del mar territorial uruguayo. A pesar del alto costo computacional de estos modelos (especialmente cuando se simulan procesos tridimensionales), el gran incremento de capacidad de cómputo que se ha dado en los últimos años, por el desarrollo de *hardware* principalmente, ha permitido superar esa barrera y en la actualidad esto no es un obstáculo. En ese sentido, Uruguay cuenta con el Centro Nacional de Supercomputación (ClusterUY), una plataforma de computación de alto desempeño que posee la capacidad de gestionar en forma coordinada múltiples recursos de cómputo y es utilizada por científicos e investigadores de todo el país.

En esta segunda parte del capítulo se describen las implementaciones de modelos numéricos en el mar territorial uruguayo desarrolladas para resolver: 1) la dinámica de mareas, 2) la dinámica del campo salino, 3) la dinámica de los sedimentos finos, 4) la generación y la propagación del oleaje y 5) la dinámica costera. Para cada uno de estos modelos se referencian las ecuaciones gobernantes, se describen las principales características de las mallas de cálculo y forzantes, y los procesos de calibración y validación realizados.

Modelos hidrodinámicos 2D

La hidrodinámica del Río de la Plata y su frente marítimo depende fuertemente de las mareas astronómica y meteorológica que ingresan desde el océano Atlántico (Santoro *et al.*, 2013) y de los forzantes locales (atmosféricos, caudales erogados por sus afluentes, etc.). Por tanto, para estudiar la dinámica de mareas en el mar territorial uruguayo se desarrolló un modelo regional que resuelve la marea en el océano Atlántico Sur y modelos locales que reciben dicha condición de borde y resuelven la propagación de la marea en el mar territorial uruguayo.

El modelo regional del Atlántico Sur desarrollado en el IMFIA se denomina AStide (Martínez *et al.*, 2015). El AStide utiliza la versión bidimensional barotrópica del modelo numérico en volúmenes finitos MOHID, desarrollado en el Instituto Superior Técnico - Maretec de Portugal (Mateus y Neves, 2013). En el marco de un proyecto de investigación financiado por la CSIC-Udelar (IMFIA, 2015), dicho modelo permitió realizar un pronóstico retrospectivo de niveles (*hindcast*) para las últimas décadas. El modelo se calibró con base en los datos de niveles medidos en los mareógrafos de Mar del Plata (Argentina) y La Paloma (Uruguay). La calibración del modelo se realizó con base en un parámetro vinculado a la rugosidad de fondo. Las principales características de la implementación y de la calibración del modelo regional de niveles AStide se presentan en la tabla 1 y en la figura 10.

Tabla 1: Características principales de la implementación AStide del modelo numérico MOHID para resolver la propagación de las mareas en el océano Atlántico Sur

Malla de cálculo	
Dominio	Océano Atlántico Sur [22S; 54.4S] - [70W; 45.5W]
Coordenada horizontal	Latitud-Longitud
Resolución horizontal	0,1°x0,1°
Resolución vertical	1 capa (modelo 2D)
Forzantes	
Océanico	Armónicos de marea FES2004
Fluvial (ríos Uruguay y Paraná)	Caudal medio histórico (25.000 m ³ /s)
Atmosférico	Viento del NCEP reanálisis CFSR/CFSRv2 0,5°x0,5° cada 6 horas
Calibración	
Parámetro	Coefficiente de fricción de fondo
Variable de control	Nivel de mar
Estaciones control (RMSE)	Mar del Plata (0,22m) La Paloma (0,21m)
Simulaciones	
Período disponible	1985 a 2022
Frecuencia resultados	Datos horarios

Para representar la dinámica de mareas en todo el mar territorial uruguayo se generó en el año 2018 un *hindcast* de mareas de 35 años (Jackson *et al.*, 2018), con base en la implementación y la calibración del modelo bidimensional TELEMAC-MASCARET.⁵ El desarrollo del *hindcast* se realizó en el marco de los estudios del convenio con el Plan Nacional de Adaptación de la Zona Costera (NAP-Costas) (IMFIA, 2020a). El modelo TELEMAC-MASCARET trabaja en una grilla en elementos finitos y para estudiar la propagación de mareas se utiliza el modelo TELEMAC2D, que resuelve las ecuaciones gobernantes de Navier-Stokes integradas en la vertical (Hervouet, 2007). Se trata de un modelo de última generación, de código abierto,

⁵ Disponible en <http://www.opentelemac.org/>

muy eficiente computacionalmente, en continuo desarrollo por grupos de reconocido prestigio internacional y con una comunidad de usuarios extendida y con fluida comunicación. El modelo se calibra con datos de niveles medidos en diversos mareógrafos de la costa uruguayo. La calibración del modelo se realizó con base en un parámetro vinculado a la rugosidad de fondo y otro parámetro vinculado al arrastre del viento en la superficie libre. Las principales características de la implementación y de la calibración del *hindcast* de niveles se presentan en la tabla 2 y en la figura 11. El *hindcast* de mareas generado forma parte del atlas de dinámicas marinas impulsado por el NAP-Costas, que está disponible para todo público en el observatorio ambiental nacional del Ministerio de Ambiente.

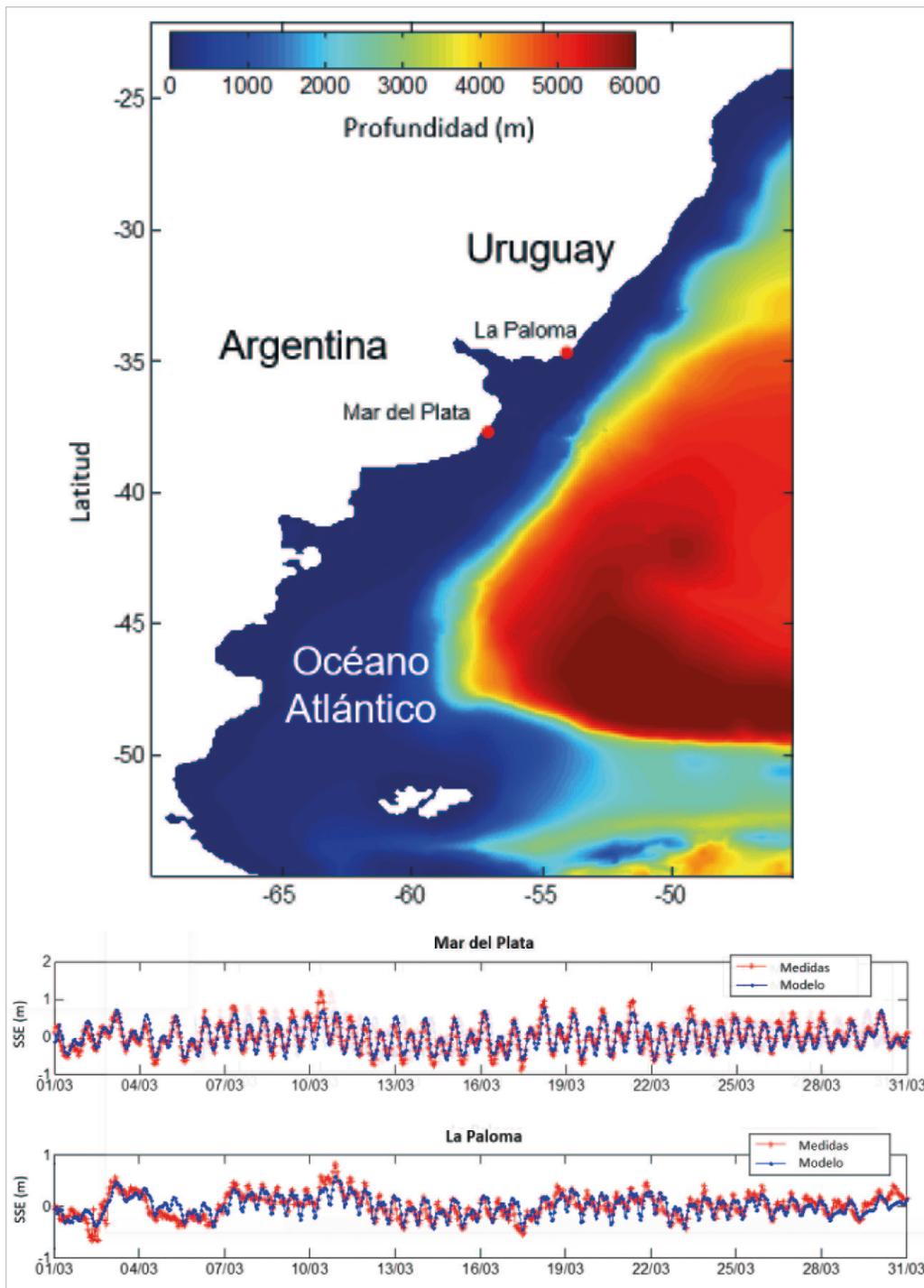


Figura 10: Panel superior: Dominio y batimetría (m) del modelo del Atlántico Sur (AS tide). Panel inferior: Ejemplo de resultado del modelo calibrado, serie temporal de nivel medido y modelado en Mar del Plata y La Paloma (marzo de 2004).

Tabla 2: Características principales de la implementación del modelo numérico TELEMAC2D para generar el hindcast de nivel de mar en el mar territorial uruguayo

Malla de cálculo	
Dominio	Río de la Plata y Frente Marítimo entre Mar del Plata (Argentina) y Río Grande (Brasil), hasta 170 km <i>offshore</i>
Coordenada horizontal	Latitud-Longitud
Resolución horizontal	0,02°x0,02°
Resolución vertical	10 capas tipo sigma
Forzantes	
Océanico	Nivel y corrientes 2D horarios modelo AStide
Fluvial (ríos Uruguay y Paraná)	Caudal diario
Atmosférico	Viento del ECMWF reanálisis ERA-INTERIM/ERA-5 0,25°x0,25° cada 6 horas
Calibración	
Parámetros	Coefficiente de fricción de fondo Coefficiente de arrastre del viento
Variable de control	Nivel de mar
Estaciones control (RMSE)	Montevideo (0,18m) Pilote Norden (0,22m) Torre Oyarvide (0,18m)
Variable de control	Salinidad
Estaciones control (RMSE)	Boya Oceanográfica (4 psu)
Variable de control	Corriente
Estaciones control (RMSE)	Boya Oceanográfica (0,18 m/s)

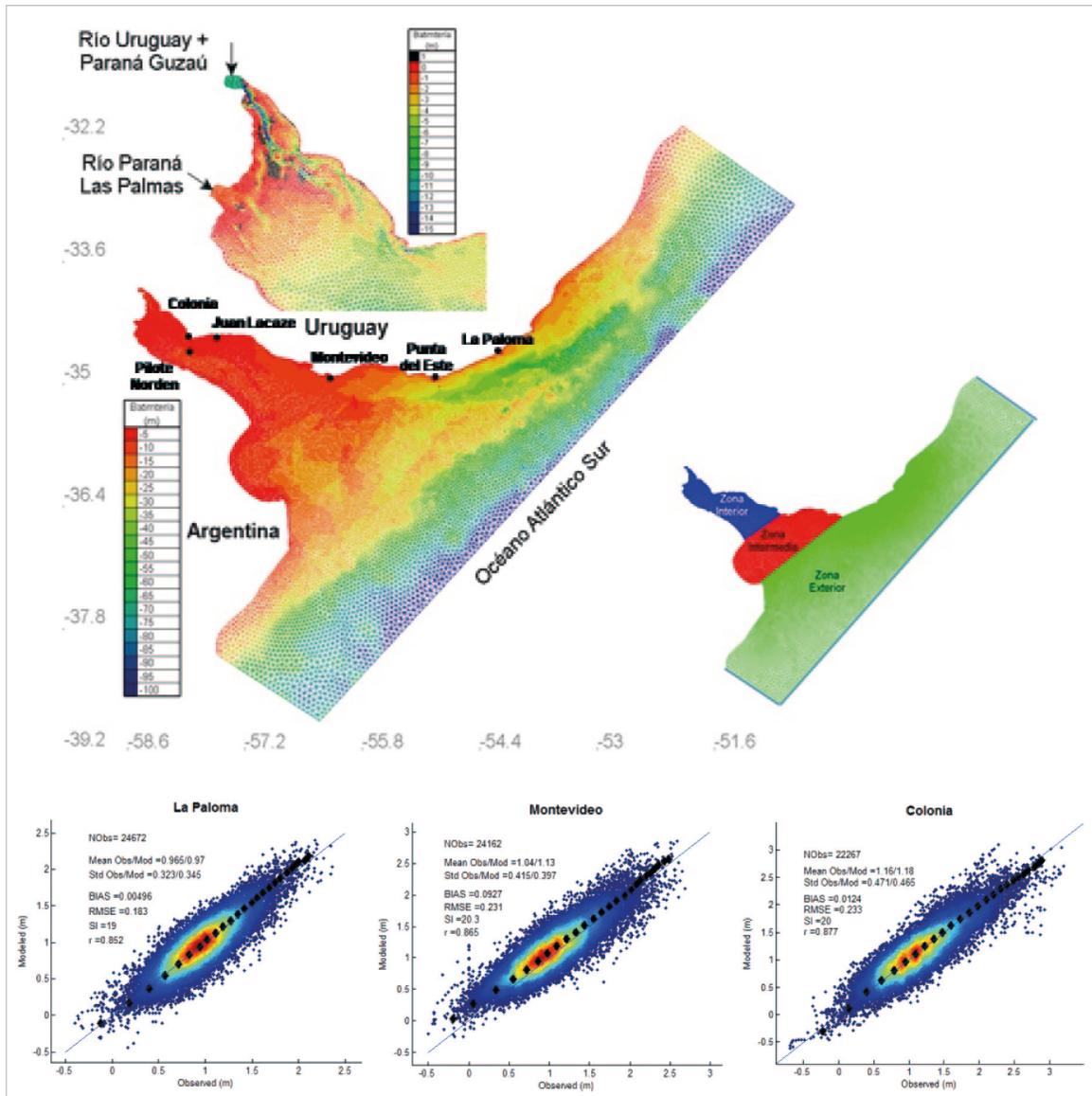


Figura 11: Panel superior: Dominio y batimetría (m) del hindcast de nivel de mar (modelo TELEMAC2D); en el panel superior izquierdo se presenta un detalle del ingreso de los ríos Paraná y Uruguay; en el panel inferior derecho se marcan las zonas en las cuales se define distinta rugosidad de fondo y los nodos del borde oceánico donde se imponen los niveles del modelo AS tide. Panel inferior: Gráficos de dispersión y cuantil-cuantil entre datos medidos y modelados con el hindcast en las estaciones de La Paloma, Montevideo y Colonia (modelo calibrado).

Modelos hidrodinámicos 3D

Para estudiar las corrientes tridimensionales y la dinámica del campo salino en el mar territorial uruguayo se ha implementado y calibrado el modelo hidrodinámico baroclínico tridimensional MOHID en la zona, cuya configuración actual se denomina RPtide (IMFIA, 2015; Alonso *et al.*, 2017; Jackson *et al.*, 2021). El MOHID resuelve las ecuaciones 3D baroclínicas de Navier-Stokes con la promediación de Reynolds con las aproximaciones de Boussinesq e hidrostática. En la configuración actual el RPtide cuenta con 10 capas en la vertical y 3 km de resolución horizontal en todo el dominio. Esta resolución es suficiente para estudiar aspectos de la hidrodinámica 3D (Fossati y Piedra-Cueva, 2013) y del campo salino (Jackson *et al.*, 2021). No obstante, el modelo permite trabajar con modelos anidados, generando submodelos en regiones del mar territorial uruguayo con mayor resolución horizontal, que reciben las condiciones de borde del modelo global. Una serie de modelos anidados fue utilizada para estudios de descargas de emisarios costeros en Montevideo y Punta de Este en el marco de convenios (IMFIA, 2007, 2008; Fossati *et al.*, 2013). El modelo se ha calibrado con base en registros *in situ* de niveles, corrientes y salinidad. Las principales características de la implementación y de la calibración del modelo RPtide se presentan en la tabla 3 y en la figura 12.

La dinámica de sedimentos finos es muy relevante para el ecosistema (clima lumínico, adsorción de sustancias, etc.) y, además, es de especial interés para ciertas actividades antrópicas como la navegación y la actividad portuaria. En el IMFIA se han llevado a cabo

varios estudios sobre la dinámica de sedimentos finos del Río de la Plata y su frente marítimo en general (Fossati, 2013; FREPLATA, 2011). En particular en la zona costera de Montevideo, donde se ubica la principal zona portuaria del país, el lecho está compuesto por sedimentos finos y mantener los canales de navegación requiere trabajos continuos de dragado. En el marco de proyectos de investigación (IMFIA y LHSV, 2017), tesis de posgrado (Santoro, 2017) y convenios de asesoramiento técnico (IMFIA, 2017) se han estudiado las principales características hidrosedimentológicas de la bahía de Montevideo y el recinto portuario con base en el desarrollo de un modelo tridimensional y mediciones de campo realizadas en la zona. El estudio con herramientas de modelación numérica de la morfodinámica de estos casos requiere alta resolución espacial en las mallas de cálculo implementadas para poder representar adecuadamente la geometría del dominio (canales, escolleras, etc.). Además, modelos que utilicen mallas no estructuradas presentan la ventaja de poder incrementar la resolución espacial específicamente en la zona portuaria y de canales de navegación, y representar mejor la geometría de las estructuras marítimas. Considerando entonces los procesos que deben tenerse en cuenta (por ejemplo, circulación, oleaje, transporte de sedimentos), la ventaja de utilizar mallas no estructuradas y la eficiencia computacional, se escogió como herramienta numérica el modelo TELEMAC-MASCARET (Hervouet, 2007), el cual cuenta con módulos hidrodinámicos tanto bidimensionales como tridimensionales baroclínicos (TELEMAC2D/TELEMAC3D), un módulo de propagación de oleaje (TOMAWAC), módulos de transporte de sedimentos tanto integrado

en vertical (SYSIPHE) como tridimensional (SEDI3D), entre otros. Los mencionados módulos se encuentran acoplados de manera interna, lo que permite modelar la circulación,

el oleaje y el transporte de sedimento en forma simultánea sobre una misma grilla de cálculo. La discretización utilizada por el modelo es de elementos finitos.

Tabla 3: Características principales de la implementación 3D del modelo numérico MOHID para modelar la hidrodinámica y el campo salino en el mar territorial uruguayo

Malla de cálculo	
Dominio	Río de la Plata y frente marítimo entre Mar del Plata (Argentina) y Río Grande (Brasil), hasta 170 km <i>offshore</i>
Coordenada horizontal	Latitud-Longitud
Resolución horizontal	Variable: 7 km océano, 2 km zona estuario y 1 km costa uruguayo
Resolución vertical	1 capa (modelo 2D)
Forzantes	
Océanico	Nivel y corrientes 2D horarios modelo AS tide (con ajuste*)
Fluvial (ríos Uruguay y Paraná)	Caudal diario
Atmosférico	Viento del NCEP reanálisis CFSR/CFSRv2 0,31°x0,31° cada 1 hora
Calibración	
Parámetros	Coefficiente de fricción de fondo (variable espacialmente) Coefficiente de arrastre del viento
Variable de control	Nivel de mar
Estaciones control (RMSE)	Montevideo (0,23 m)
	La Paloma (0,18 m)
	Colonia (0,23 m)
	Pilote Norden (0,26 m)
	Juan Lacaze (0,26 m)
Punta del Este (0,21 m)	
Simulaciones	
Período disponible	1985 a 2016
Frecuencia resultados	Datos horarios

El modelo implementado incluye los principales forzantes externos que intervienen en la dinámica de flujo, sedimentos y oleaje en la costa de Montevideo: las mareas astronómica y meteorológica, así como el oleaje, que provienen del Atlántico Sur, los caudales fluviales y la carga de sedimentos que descargan en el Río de la Plata (ríos Uruguay y Paraná) y

los afluentes locales (río Santa Lucía, arroyos Pantanoso y Miguelete), y los forzantes meteorológicos (vientos y presiones) que actúan sobre la superficie libre. Estos tres módulos han sido calibrados utilizando datos *in situ* de niveles, perfiles verticales de corrientes, salinidad, parámetros de oleaje, concentración de sedimento en suspensión y turbidez

(Santoro, 2017; Santoro *et al.*, 2017, 2018). Las principales características de la implementación y de la calibración del modelo de

sedimentos finos se presentan en la tabla 4 y en la figura 13.

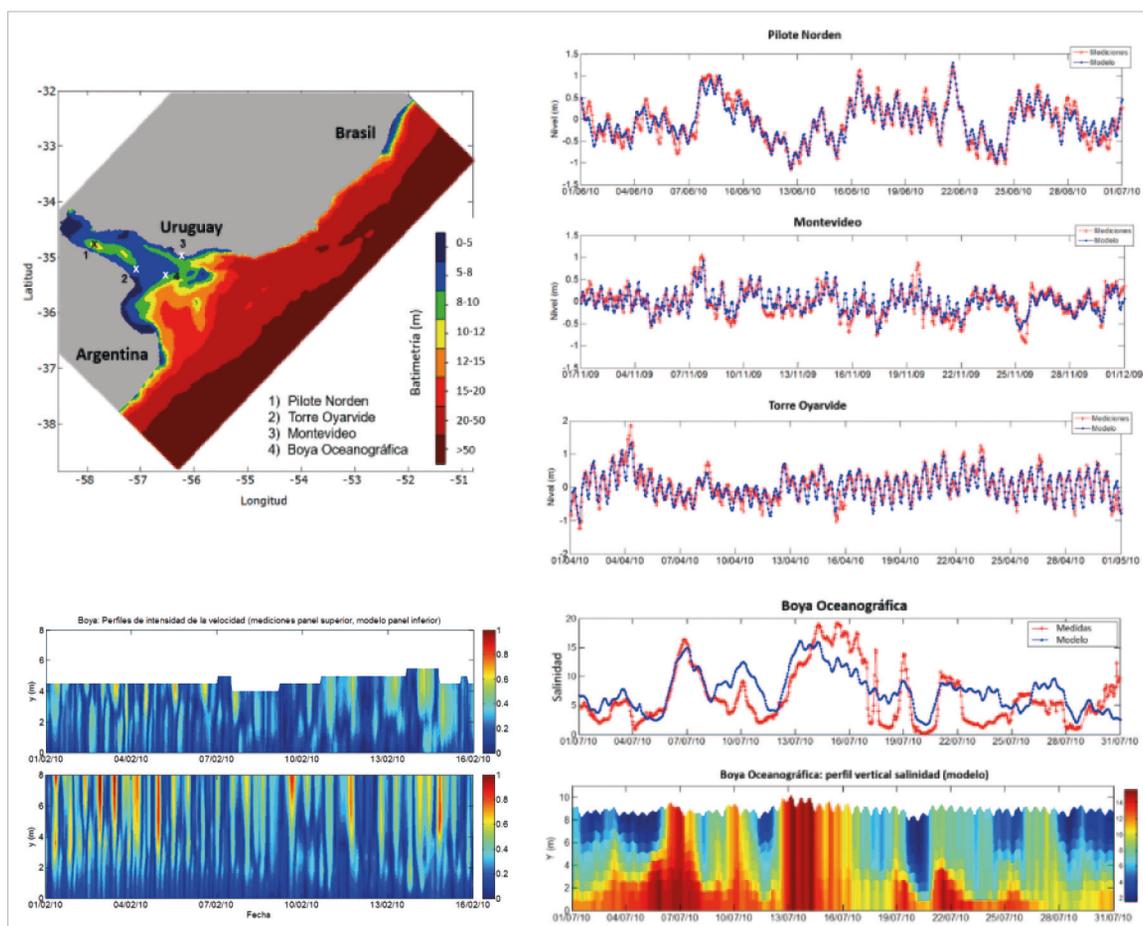


Figura 12: Panel superior izquierdo: Dominio y batimetría (m) del modelo 3D hidrodinámico baroclínico RPtide (modelo MOHID). Panel superior derecho: Ejemplo de comparación de la serie de niveles medida y obtenida con el modelo calibrado en Montevideo, Pilote Norden y Torre Oyarvide. Panel inferior izquierdo: Comparación del perfil vertical de intensidad de corriente medido y obtenido con el modelo calibrado en la boya oceanográfica. Panel inferior derecho: Comparación de la salinidad medida y obtenida con el modelo calibrado en la boya oceanográfica; ejemplo de perfil vertical de salinidad obtenido con el modelo en la boya oceanográfica.

Tabla 4: Características principales de la implementación 3D del modelo numérico TELEMAC para modelar la dinámica de sedimentos finos en el mar territorial uruguayo

Malla de cálculo			
Dominio	Río de la Plata y frente marítimo entre Mar del Plata (Argentina) y Río Grande (Brasil), hasta 170 km <i>offshore</i>		
Coordenada horizontal	UTM		
Resolución horizontal	Variable: 2 km océano, 500 m zona estuario y hasta 20m en la Bahía de Montevideo		
Resolución vertical	16 capas sigma (modelo 3D)		
Forzantes			
Océanico	Nivel y corrientes 2D horarios modelo AStide		
Fluvial	Ríos Uruguay y Paraná: caudal diario Río Santa Lucía, arroyos Miguelete y Pantanoso: caudal medio		
Atmosférico	Viento y presión atmosférica en superficie del ECMWF ERA-Interim reanálisis 0,125°x0,125° cada 6 horas		
Calibración			
Parámetros	Coefficiente de fricción de fondo Coefficiente de arrastre del viento Tensiones críticas de erosión y sedimentación Tasa de erosión en función del exceso de tensión Velocidad de caída del sedimento		
Estación de control	Montevideo		
Variables de control		CRMSE	Correlación (Pearson)
	Nivel del mar	0,19 m	0,9
	Corrientes	0,19 m/s	0,75
	Parámetros de oleaje (Hs / Tp)	0,15m / 2,6 s	0,86 / 0,12
	Salinidad	4,58 ppt	0,57
	Concentración de sedimento en suspensión	76 mg/l	0,49
Simulaciones			
Período disponible	2014-2015		
Frecuencia resultados	Datos horarios		

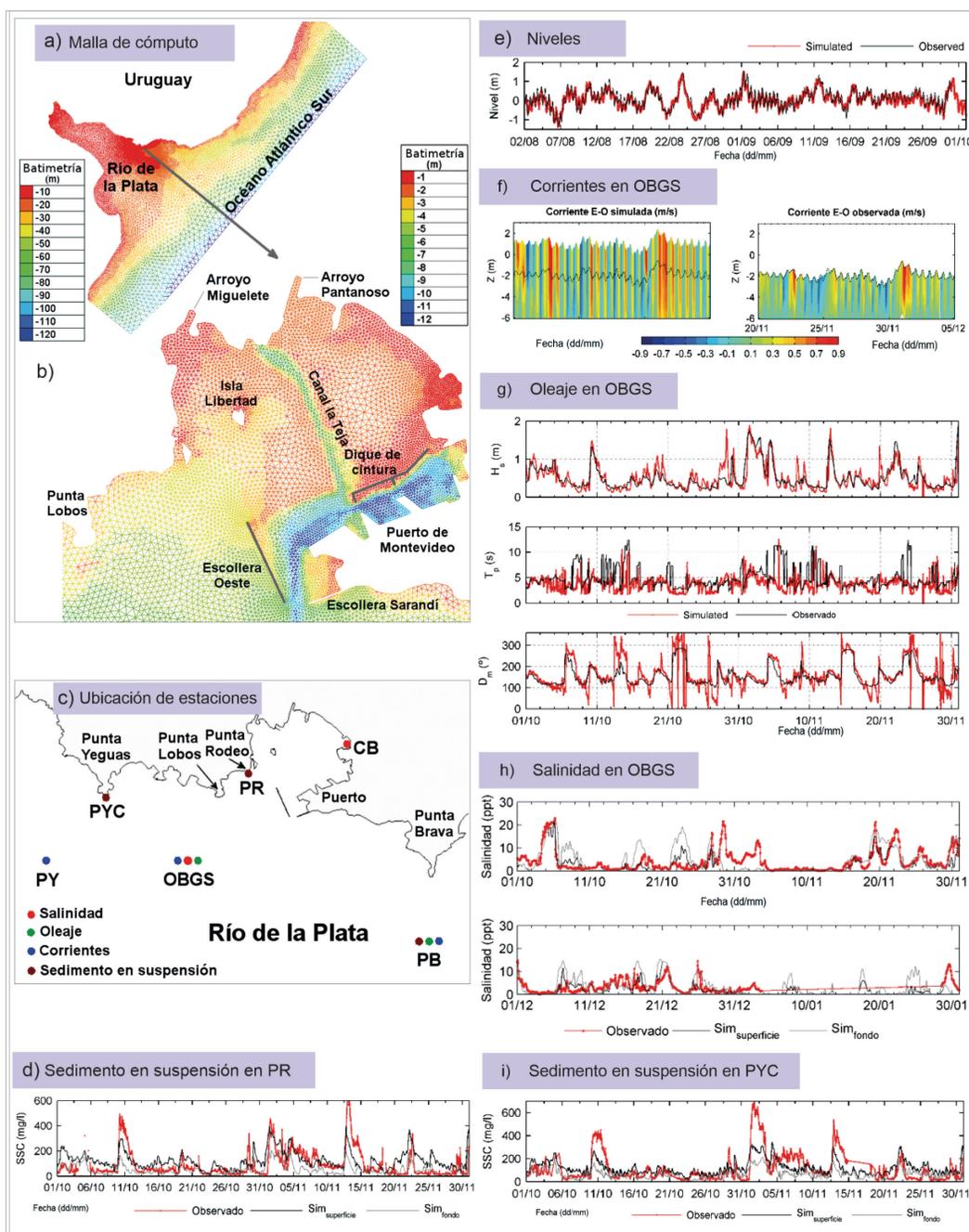


Figura 13: a) Dominio y batimetría (m) del modelo 3D hidrodinámico TELEMAC y b) detalle en la bahía de Montevideo. c) Ubicación de estaciones con datos de campo y variables disponibles. Ejemplos de comparación de resultados del modelo con observaciones para: e) niveles de mar en el puerto de Montevideo; f) corrientes en el punto OBGS (se muestra la dirección principal este-oeste); g) parámetros de oleaje (altura significativa H_s , período pico T_p y Dirección media D_m) en el punto OBGS; h) salinidad en punto OBGS; d) concentración de sedimento en suspensión en el punto PR; i) concentración de sedimento en suspensión en el punto PYC.

El modelo tridimensional permitió analizar las corrientes, el sedimento en suspensión, las tensiones de fondo y la evolución del sedimento del fondo en la costa de Montevideo y en la bahía y recinto portuario (Santoro, 2017). Dicho análisis permitió: identificar patrones de circulación en la bahía y su respuesta a los principales forzantes; cuantificar los flujos de agua y sedimento en las bocas de la bahía; identificar los principales patrones de deposición y erosión de material de fondo; y estimar tiempos de residencia mediante experimentos numéricos con trazadores. A su vez, la herramienta numérica fue utilizada para analizar el efecto de distintas obras marítimas proyectadas en la zona sobre la hidrodinámica, la dinámica de sedimentos finos y los tiempos de residencia del agua en la bahía de Montevideo y el recinto portuario (IMFIA, 2017), así como analizar el efecto de descargas de efluentes en la bahía (IMFIA, 2020c). El modelo fue utilizado también para analizar la variabilidad espaciotemporal del frente de turbidez en el Río de la Plata, combinando análisis de datos de campo, teledetección y modelación numérica (Maciel *et al.*, 2021).

Modelos de propagación de oleaje

A partir de 2010, en el marco de un proyecto Fondo Sectorial de Energía (FSE) - ANII (IMFIA, 2012) se implementa en el IMFIA por primera vez un modelo numérico de oleaje que abarca toda el área marítima del país con una resolución que permite aproximarse a 5 km de la costa con resultados fiables a partir de simulaciones no estacionarias de períodos largos. El modelo utilizado fue el WAVEWATCH III (Tolman, 2009), alimentado por campos de viento del reanálisis atmosférico CFSR (Saha *et al.*, 2010) y

tomando como datos de referencia principal para la selección de parametrizaciones del modelo y posterior calibración datos satelitales altimétricos de altura de ola significativa (Hs). A partir de él se realizó un *hindcast* (por ejemplo, simulación retrospectiva) del período 1979-2010 con el objetivo primario de caracterizar el potencial undimotriz del país (Alonso *et al.*, 2015b). Más allá de esta finalidad, la base de datos generada fue aprovechada en los subsiguientes proyectos portuarios y costeros, los cuales dispusieron de datos de oleaje de mejor calidad siguiendo una metodología que consiste en la bajada de escala (*downscaling*) del *hindcast* al sitio de cada proyecto.

Este primer *hindcast* de oleaje para Uruguay, al estar motivado por el estudio del potencial undimotriz, se enfocó principalmente en el Atlántico y si bien incluyó al Río de la Plata no se abordaron con suficiente detalle algunos aspectos relevantes que atañen a la modelación del oleaje en un cuerpo de agua con las particularidades de este estuario de grandes dimensiones. Esto motivó un segundo *hindcast*, desarrollado en el marco de un proyecto FSE-ANII (IMFIA, 2016b). Los principales avances fueron la incorporación de campos no estacionarios de niveles de mar y corrientes como datos de entrada, la mejora en la resolución de los dominios espaciales y espectrales, la actualización de las nuevas parametrizaciones disponibles en el WAVEWATCH III y la consideración en la etapa de calibración de los procesos de interacción del oleaje con el fondo. Estos avances permitieron mejorar los resultados en general y particularmente en el Río de la Plata, a la vez que, a partir de experimentos numéricos con el modelo, prendiendo y apagando

procesos y forzantes, se cuantificó su peso relativo y su distribución espacial (Alonso y Solari, 2020). Este nuevo *hindcast* permitió una caracterización exhaustiva del clima de olas a lo largo de toda la costa del país y la interpretación de su transición entre dos ambientes bien distintos, como son la costa Atlántica y la costa de la zona interior del estuario (Alonso y Solari, 2021). Se destaca que este segundo *hindcast* forma parte del atlas de dinámicas marinas impulsado por el NAP-Costas, que está disponible para todo público en el observatorio ambiental nacional del Ministerio de Ambiente.

Dinámica costera

Nuestra costa está conformada mayoritariamente por playas de arena. Al tratarse de un sedimento plausible de ser transportado por la acción del oleaje, las corrientes y el viento, la morfología de las playas experimenta cambios permanentemente. Estos cambios responden a factores tanto de origen natural —como la variabilidad climática de los agentes forzantes (oleaje, corrientes, viento y nivel de mar) y la variabilidad en las tasas de intercambio de sedimentos con el resto de las componentes del sistema costero (por ejemplo, dunas, afluentes fluviales que descargan en la costa o arcos de playa adyacentes)— como de origen antrópico, producto de intervenciones que modifiquen la hidrodinámica del sistema, restrinjan el espacio que dispone la playa para moverse, alteren el intercambio de sedimentos con las otras componentes del sistema costero o directamente extraigan o aporten arena al sistema. Cuando esta dinámica entra en conflicto con la actividad humana a través de problemas de erosión o sedimentación es que se requieren

respuestas desde la ingeniería de costas y los modelos de dinámica costera son herramientas fundamentales para abordar esta tarea.

En el IMFIA se ha trabajado en la adaptación local de estos modelos y su utilización tanto para atender problemáticas de erosión y sedimentación (por ejemplo, Alonso *et al.*, 2014, 2018) como para generar insumos para la gestión del espacio costero con base en conocimiento (por ejemplo, Teixeira *et al.*, 2012; Teixeira y Solari, 2020; Solari *et al.*, 2014, 2018).

Se hace mención a *modelos* en plural, ya que, como la dinámica costera responde a diversas escalas temporales, desde el corto plazo como (por ejemplo, la respuesta de la playa ante un evento de tormenta, en escala de horas/días) hasta el largo plazo (por ejemplo, la respuesta de la playa al aumento del nivel medio del mar, en escala de decenas de años), pasando por el mediano plazo (por ejemplo, la respuesta ante un intervención que altere el transporte litoral, en escala de meses/años), se debe recurrir al tipo de modelo que sea más eficiente y eficaz para resolver la escala donde se busca poner el foco. Para los análisis de corto plazo se ha recurrido a los modelos de base física a partir de procesos XBeach (Roelvink *et al.*, 2009) y Delft3D (Delft, 2020); para el mediano plazo se ha trabajado con modelos de una línea como el Shoreline-S (Roelvink *et al.*, 2020) e implementando un código propio en Matlab®; mientras que para el largo plazo se ha trabajado con modelos de equilibrio (por ejemplo, MepBay, Klein *et al.*, 2003) y modelo de respuesta de la playa al aumento del nivel medio del mar (ShoreTrans, McCarroll *et al.*, 2021).

Aplicaciones

Evaluación de energías marinas (undimotriz y mareomotriz) en el mar territorial uruguayo

Las energías marinas en Uruguay por ahora sólo han sido analizadas desde el ámbito académico. Se han realizado tres proyectos con el apoyo de la ANII, a través del FSE. Dos de ellos fueron sobre energía undimotriz: URU-WAVE I, entre 2010 y 2012 (IMFIA, 2012), y URU-WAVE II, entre 2014 y 2016 (IMFIA, 2016b), y el otro sobre corrientes marinas, entre 2014-2016 (IMFIA, 2016c). Además, investigadores uruguayos participan en dos proyectos internacionales sobre energías marinas: uno en el marco de ERANET - LAC: SUSME y el otro en el marco de CYTED: REMAR, ambos iniciados en 2019 y activos en 2023.

Situado en latitudes medias con una costa micromareal, la energía undimotriz parece ser la forma de energía amarina más adecuada para el aprovechamiento en Uruguay. En este sentido, se desarrollaron dos *hindcasts* de oleaje (Alonso *et al.*, 2015b; Alonso y Solari, 2020), a partir de los cuales se investigó el clima de oleaje (Alonso y Solari, 2021) y se evaluó el recurso oleaje, tanto aislado (Alonso *et al.*, 2015b) como en combinación con corrientes marinas (Alonso *et al.*, 2017).

En cuanto a los dispositivos de captura, priorizando los dispositivos *nearshore*, donde la generación de energía eléctrica puede realizarse en tierra, la investigación uruguayana se ha centrado en un tipo de WEC conocido como Oscillating Wave Surge Converter

(OWSC), que bombea agua oceánica en tierra mediante un cilindro hidráulico. Partiendo de una aproximación analítica que permitió evaluar el potencial técnico de este dispositivo ubicado en el rompeolas del puerto de La Paloma (Alonso *et al.*, 2015a), la investigación continuó con un modelo físico 1:10 del OWSC bajo oleaje regular e irregular realizado en el gran canal de oleaje del IMFIA (Brito *et al.*, 2019a, 2020). El experimento fue acompañado de estudios numéricos (Brito *et al.*, 2019b) y también de un estudio experimental del cilindro hidráulico utilizado como toma de fuerza (Brito *et al.*, 2017).

Para las pruebas de laboratorio de los *wave energy converters* (WEC), el IMFIA dispone de un gran canal de olas, que mide aproximadamente 60 m de largo (dirección de las olas), 1,5 m de ancho y 1,8 m de profundidad, y está equipado con un generador de olas de tipo pistón. Este generador de olas está controlado por AwaSys 6 (Andersen y Frigaard, 2014), que puede generar olas regulares e irregulares con absorción activa de las olas reflejadas. Al final del canal de olas, hay una playa de absorción pasiva con una pendiente longitudinal de 0,3 m/m.

Con base en los resultados del modelo de corrientes 3D RPTide y del oleaje calculado por el *hindcast*, se realizó la determinación de las zonas del mar territorial uruguayo potenciales para la obtención de energía mareomotriz y undimotriz (Alonso *et al.*, 2017). Como resultado se generaron mapas de energía potencial para ambas fuentes, que fueron superpuestos con otros usos para identificar zonas de posible explotación. Los resultados confirman que, debido a que se trata de una zona micromareal, la energía de

oleaje es de mayor magnitud que la energía hidrocínética. Los estudios muestran un potencial de energía undimotriz de 30 kW/m en el rompiente de la plataforma continental, es decir, a 200 km de la costa, que disminuye a 20 kW/m a 70 km de la costa y a unos 10 kW/m cerca de la costa atlántica en la isóbata de 20 m (figura 14), mientras que en el Río de la Plata exterior, debido a su escasa profundidad, las olas de tormenta se disipan

por la fricción del fondo y el recurso energético de las olas disminuye de 7 kW/m a 1 kW/m e incluso a valores inferiores al pasar a la zona intermedia e interior del estuario. La zona exterior del mar territorial uruguayo se identifica como la zona más prometedora para implementar granjas experimentales de energía marina, incluso para testear ambas fuentes.

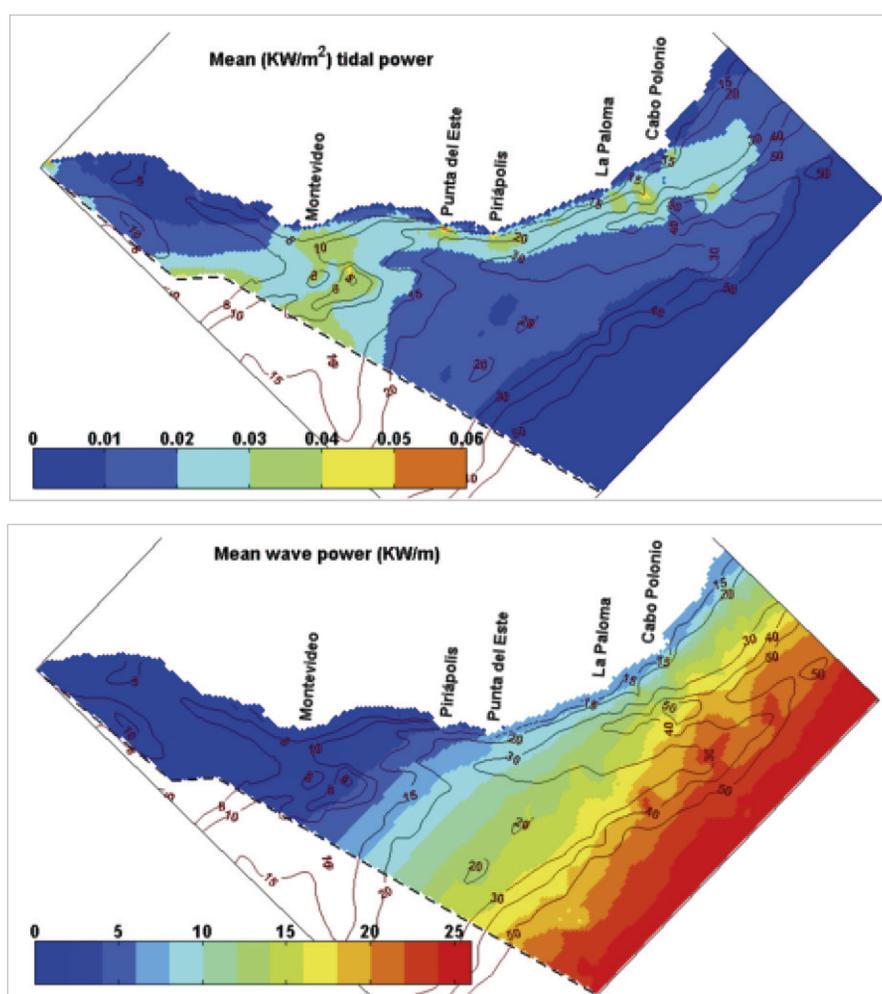


Figura 14: Panel superior: Mapas de potencia hidrocínética por unidad de superficie (kW/m^2) (valor medio) calculados utilizando la velocidad de la corriente promediada en profundidad. Panel inferior: Mapas de potencia media de las olas por unidad de longitud (kW/m). Fuente: Alonso et al. (2017).

Cuantificación de los efectos del cambio climático sobre el nivel del mar en la costa uruguaya

Con base en los modelos de marea descriptos (AStide y *hindcast* local), se realizó un estudio de la cuantificación del efecto del cambio climático en los niveles de mar en el mar territorial uruguayo (Jackson, 2021; Jackson *et al.*, 2022a, 2022b). Con la aproximación de *downscaling* dinámico, se utilizaron las proyecciones de vientos superficiales y presiones a nivel de mar de modelos climáticos globales correspondientes a la fase 5 del proyecto de intercomparación de modelos acoplados (Coupled Model Intercomparison Project Phase 5, CMIP5) para forzar los modelos de marea. Las simulaciones de nivel de mar se realizaron para tres horizontes temporales: histórico (1985-2005), corto plazo (2027-2045) y largo plazo (2082-2100), y para dos escenarios: RCP 4.5 y RCP 8.5.

Del trabajo realizado se concluye que la principal componente del cambio en el nivel del mar es el aumento del nivel medio del mar, siguiéndole el efecto que este aumento tiene sobre la marea astronómica. Además, se obtuvo que los cambios en los residuos meteorológicos de marea asociados a los cambios potenciales en los patrones atmosféricos de circulación son despreciables en el área de estudio. El cambio en la media de nivel de mar total a largo plazo y para el escenario más severo RCP 8.5 es de 61 cm, mientras que el aumento en el cuantil 99% a largo plazo para el escenario más severo RCP 8.5 alcanza los 74 cm en la zona costera desde Colonia hacia el interior del estuario y los 71 cm en la zona costera de Montevideo. Estos resultados reafirmaron la necesidad de utilizar la

metodología de *downscaling* dinámico para proyectar los cambios en el nivel de mar total en áreas estuariales de poca profundidad y gran ancho, como el mar territorial uruguayo, ya que esta metodología resuelve las interacciones que puede haber entre las ondas de marea astronómica y meteorológica y el nivel medio del mar, algo que no se representa con la aproximación de *downscaling* estadístico.

Sistema de pronóstico PronUY_RPFM

En Uruguay existe actualmente el sistema de pronóstico de condiciones meteoceánicas en las aguas territoriales marítimas, PronUY_RPFM. El sistema cuenta actualmente con un producto disponible en tiempo real: el pronóstico del nivel de mar horario para los próximos tres días, el cual se evalúa contra datos *in situ* recolectados por mareógrafos y publicados en tiempo real.⁶

El sistema de pronóstico desarrollado tiene cinco componentes: 1) extracción de datos externos, 2) base de datos, 3) modelo numérico, 4) evaluación del sistema y 5) difusión. Estos componentes se relacionan entre sí y son ejecutados de manera secuencial. El primer componente (extracción de datos externos) se refiere a la descarga y curaduría diaria de datos que necesita el modelo numérico para realizar las simulaciones (como, por ejemplo, los forzantes externos provenientes de modelos globales) o para evaluar los resultados (mediciones de mareógrafos en el área de estudio). El segundo componente es el mantenimiento de base de datos, donde se acumulan tanto los datos descargados como los resultados del pronóstico. El tercer

⁶ Disponible en <https://www.fing.edu.uy/imfia/pronostico-marea/>

componente (el modelo numérico hidrodinámico) es lo que define el prototipo específico del pronóstico y refiere a las características de implementación del modelo (modelo numérico, dominio, malla de cálculo, forzantes, parámetros, variables, entre otros). El cuarto componente (evaluación del sistema) incluye todos los aspectos de evaluación de la calidad del pronóstico, lo cual son utilizados datos medidos *in situ* (niveles de mareógrafos) en toda la zona de interés. El quinto componente incluye el diseño y la ejecución de la interfaz del pronóstico de manera pública para todo usuario y en tiempo real.

El proceso de trabajo mantiene dos ambientes: desarrollo y producción. En la modalidad de desarrollo es donde se desarrollan y testean distintas variaciones de un prototipo (condición de borde, parámetros del modelo numérico, períodos históricos, etc.) y una vez que los cambios son definitivos se pasan a la modalidad de producción, que corresponde al prototipo ejecutado en tiempo real y difundido públicamente.

El prototipo actual (prototipo_1) del sistema de pronóstico desarrollado está automatizado y en funcionamiento desde el año 2021, publica resultados en tiempo real y refiere al pronóstico de niveles de marea. El modelo numérico es forzado con pronósticos diarios de modelos globales (oceánico y atmosférico). El sistema se ejecuta una vez al día generando un pronóstico hidrodinámico con un horizonte temporal de tres días. En la figura 15 se resume en forma gráfica la arquitectura del sistema diseñado, con las principales interacciones entre los diferentes componentes y el orden cronológico de las tareas. El modelo numérico de base utilizado es el

TELEMAC2D y es forzado con el pronóstico diario oceánico global RTOFS- HYCOM y el pronóstico meteorológico global del NCEP (NOAA), ambos con información horaria. El pronóstico de niveles es evaluado en tiempo real con datos medidos *in situ* por diez mareógrafos ubicados en el área de estudio cuyos datos están disponibles en línea publicados por Argentina y Uruguay y son descargados diariamente por el sistema. El modelo hidrodinámico fue calibrado con base en la modificación de los parámetros vinculados a fricción de fondo y tensión de corte superficial del viento. Como resultado, el modelo ha sido ajustado y el pronóstico disponible permite predecir los niveles con buena calidad tanto en condiciones medias como en condiciones de niveles extremos altos y bajos (Balparda *et al.*, 2022).

Para el desarrollo de este pronóstico se trabaja de manera interdisciplinaria, entre ingenieros especialistas en computación y especialistas en modelación numérica de estuarios, y actualmente se están sumando especialistas en modelación atmosférica para generar un producto específico de PronUY_RPFM de pronóstico local de vientos y presiones con el modelo de atmosfera WRF. Además, se está desarrollando la implementación de un pronóstico de propiedades del agua, salinidad y temperatura en el Río de la Plata y frente marítimo, con base en el modelo numérico MOHID utilizado para desarrollar el pronóstico operacional de Portugal.⁷

7 Disponible en <http://forecast.maretec.org/aqua/index.html>

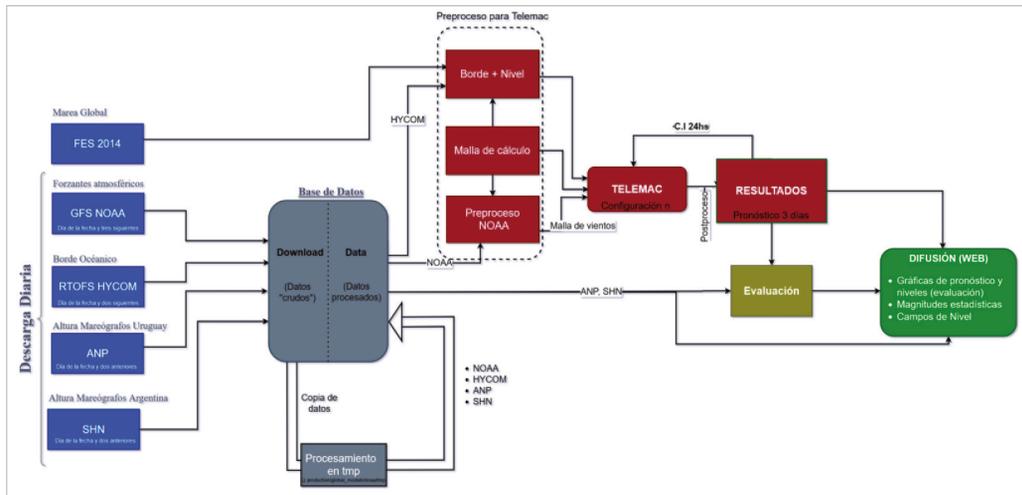


Figura 15: Diagrama general del sistema de pronóstico PronUy_RPFM, donde se incluyen los componentes (acceso a datos externos en azul, base de datos en gris, modelo numérico en rojo, evaluación en amarillo y difusión en verde) y las interacciones entre ellos.

Desafíos

El país tiene la oportunidad actualmente de avanzar en el conocimiento y la gestión de su mar territorial aprovechando el gran avance reciente en la capacidad de recolección de datos *in situ* y la gran disponibilidad actual de información remota. Esta información recolectada, correctamente depurada y analizada, y en conjunto con el desarrollo de herramientas tecnológicas como los modelos

numéricos, permitirá resolver de manera integrada aspectos de gestión de nuestra zona marítima. Desde el IMFIA y la Facultad de Ingeniería hemos mostrado cómo las investigaciones aplicadas generan conocimiento local que puede volcarse al desarrollo nacional y, en concreto, avanzar en un sistema integrado de pronóstico que esté disponible en tiempo real y de manera operativa para todos los usuarios.

Las referencias bibliográficas se encuentran en un único apartado ubicado al final del libro.

Cómo citar este capítulo: Fossati, M., R. Alonso, F. Maciel, R. Mosquera, P. Santoro, S. Solari y F. Pedocchi, 2024, Desafíos desde la ingeniería marítima: bases para el desarrollo de un sistema de pronóstico integrado del territorio marítimo nacional, en P. Gristo, G. Veroslavsky y H. de Santa Ana, eds., Territorio marítimo uruguayo: soberanía, naturaleza y recursos: Montevideo, ANCAP, pp. 321-353, doi: 10.70952/a8827tmuc4-1